

MODELADO EN EL LABORATORIO DE LA VENTILACIÓN NATURAL GENERADA POR DIFERENCIAS DE TEMPERATURA ENTRE EL EXTERIOR Y EL INTERIOR EN UNA VIVIENDA

B. M. Marino¹, L. P. Thomas¹

Instituto de Física *Arroyo Seco* – Facultad de Ciencias Exactas
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Pinto 399 – 7000 Tandil – Buenos Aires
Tel. 02293-439660/61 – Fax 02293-439669 - e-mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

RESUMEN: Bajo requisitos de similaridad dinámica se analizan los flujos de ventilación natural generados por diferencias de temperatura en el modelo físico de una vivienda con un atrio central. Se utiliza la metodología basada en el uso de agua y agua salada para modelar, respectivamente, los movimientos del aire a temperatura ambiente y del más cálido, en cuyo caso la fuerza de flotación es debida a la diferencia de salinidad entre los fluidos. Abriendo las aberturas que comunican con el exterior, diferentes situaciones son representadas para mostrar las diferencias apreciables de la evolución de los flujos internos generados. Se obtiene un sistema de ventilación natural muy eficiente cuando las aberturas de la lucarna situada sobre el atrio y al menos una de las aberturas de la planta baja están abiertas y operando conjuntamente.

Palabras clave: ventilación natural, efecto *stack*, modelado en laboratorio, visualización de flujos

INTRODUCCIÓN

La elección de la ubicación y orientación de una vivienda y la mayoría de las decisiones tomadas en las etapas de su diseño tienen un profundo efecto sobre el consumo energético necesario para su funcionamiento. Este es particularmente el caso para prever el óptimo aprovechamiento de la ventilación natural, o pasiva, en el que las decisiones tempranas determinan el potencial para el uso renovable pasivo de la energía, lo cual se traduce en los menores costos energéticos y en la disminución de la contaminación del aire interior. Un cuidadoso control sobre el aprovechamiento solar también puede reducir significativamente los costos derivados del uso de equipos de refrigeración o calefacción. Sin embargo, a pesar de los muchos beneficios directos e indirectos que implica el diseño de edificios, la elección de la forma y la orientación difiere según el propósito sea, por ejemplo, minimizar el enfriamiento o aprovechar la energía solar para calefacción. El desafío es asegurar que las diferentes partes del edificio respondan apropiadamente a los objetivos planteados, a la vez que se las integra en un todo funcional y elegante.

Por otro lado, los ocupantes de los edificios dan un lugar preferencial a la luz natural y a la vista del exterior. Cuidadosamente incorporada al diseño y controlada, la iluminación natural mejora la calidad visual de los espacios interiores y ofrece múltiples beneficios psicológicos, que son difíciles y caros de reproducir con la iluminación eléctrica. La luz natural tiene variabilidad inherente y cualidades espectrales únicas que destacan e iluminan los interiores. Combinándola con la ventilación natural, que usa el viento y la flotación del aire cálido para enfriar edificios, ambas contribuyen a proveer interiores confortables durante períodos calurosos minimizando o eliminando la necesidad de refrigeración mecánica.

Temas relacionados fueron abordados previamente por diversos autores. Entre ellos Kozak y Fernandez (2001) elaboraron un sistema de evaluación del movimiento de aire con el fin de mejorar tanto las condiciones de ventilación natural sobre casos existentes como el diseño de nuevas propuestas con respuesta eficiente a demandas de ahorro energético. La metodología desarrollada incluía el relevamiento físico del caso de análisis adoptado y su estudio mediante visualizaciones en un túnel de viento y programas de simulación por ordenador. Yarle *et al.* (2004) reportaron experiencias realizadas sobre modelos a escala y pruebas con humo con el objetivo de analizar los flujos internos de aire en edificios expuestos a ventilación natural debida principalmente al viento. Molina *et al* (2005) simulon numéricamente la circulación del aire en el interior de una casa para mostrar su dependencia con el flujo principal del aire externo considerando la distribución de los ambientes interiores y sus conexiones entre si y con el medio exterior a través de las aberturas. Filippín y Flores Larsen (2005) analizaron el comportamiento térmico de una vivienda de diseño y tecnología convencional, localizada en la ciudad de Santa Rosa, en condiciones reales de uso durante un período del invierno de 2003, y simulon numéricamente el comportamiento térmico de la misma vivienda en condiciones meteorológicas similares pero con una envolvente de mayor resistencia térmica y con un aumento del área de ventilación natural. Mostraron que, además de mejorarse la situación de invierno en cuanto a la calefacción de la vivienda (lo cual se reflejaría en un ahorro del 66% del consumo de gas para calefacción), se optimiza la iluminación natural y su comportamiento en verano. Por su parte Hernández (2005) simuló el comportamiento térmico de un edificio residencial en la ciudad de Salta, con el objeto de minimizar los requerimientos de refrescamiento auxiliar durante el verano combinando el apantallado de las ventanas colectoras de radiación solar mediante celosías o cortinas con ventilación natural nocturna.

¹ Investigador del CONICET

Reportamos aquí el análisis de los flujos internos de aire en una vivienda de dos plantas diseñada para optimizar el aprovechamiento de la ventilación natural generada por diferencias de temperatura entre el interior y exterior, a veces referida como ventilación natural conducida por efecto *stack* (del inglés, efecto *chimenea*), y ofrecer simultáneamente a sus ocupantes un excelente confort. A través del seguimiento de los flujos generados en una maqueta simplificada bajo criterios de similaridad fluidodinámica, el modelo físico empleado nos permite comprobar la óptima utilización de la disposición de las aberturas, y en particular de las incluidas en una lucarna situada sobre el atrio central de la vivienda.

VENTILACIÓN CONDUCTIDA POR DIFERENCIAS DE TEMPERATURA

Cuando se planea aprovechar la ventilación natural como el medio principal de enfriamiento de una vivienda deben considerarse los siguientes dos principios:

- + El viento induce diferencias de presión entre los lados de un edificio y sobre el techo, lo que da lugar a la formación de un flujo de aire dentro del edificio desde las aberturas a barlovento hacia las que están a sotavento. Estas diferencias de presión varían con la forma del edificio, la dirección del viento, y la presencia de construcciones y árboles circundantes.

- + La fuerza de flotación debida a diferencias de temperatura entre el exterior y el interior de un edificio, y entre los diferentes ambientes interiores produce un flujo de aire. La tendencia natural del aire caliente a ascender y acumularse en la parte superior de la habitación produce una estratificación estable cuyo factor determinante es la localización y el tamaño de las aberturas o respiraderos.

Aunque la ventilación natural inducida por el viento es típicamente la más importante, los mejores efectos son creados usando ambos principios combinados. Además, el viento suele provocar levantamiento de polvo en ambientes áridos impidiendo ventilar en días críticos. Aquí consideramos ventilación natural en ausencia total de viento. Estamos interesados en abordar aquellas situaciones asociadas con el sobrecalentamiento del edificio generado por el funcionamiento simultáneo de distintas fuentes internas de calor (PCs, hornos, electrodomésticos, TV, personas, calefactores, etc.), es decir, con predominio de los flujos conducidos por diferencias de temperatura. Las condiciones del "peor caso" surgen en días calurosos y sin viento cuando toda la ventilación es gobernada por las fuerzas de flotación, imponiendo grandes demandas energéticas que pueden disminuirse considerablemente en un edificio ventilado naturalmente en forma eficiente.

La flotación induce enfriamiento o ventilación natural dentro de un edificio creando diferencias de presión más bajas que el viento. El aire cálido asciende y, si le es permitido salir por alguna abertura situada en la parte superior de la vivienda, impulsará el ingreso de aire a menor temperatura a los niveles inferiores. La ventilación conducida por efecto *stack* en un ambiente estratificado es más efectiva en espacios altos y con diseño de atrios o patios interiores como el caso estudiado aquí. En efecto, las diferencias de presión debidas a la flotación son directamente proporcionales a las diferencias de altura y de temperatura entre el aire entrante y el saliente. Como resultado, hay tres formas de aumentar el flujo conducido por flotación: aumentando la altura de las habitaciones, incrementando el tamaño de las aberturas y calentando el aire dentro del edificio. En general, el enfriamiento natural debe estudiarse sobre el edificio completo para asegurar la trayectoria del flujo de aire, a través y hacia fuera de las zonas y ambientes ocupados, y para garantizar seguridad ante la ocurrencia de un incendio. En cambio, el análisis habitación-por-habitación resulta útil cuando se desea analizar el flujo de aire en ambientes cerrados.

Para verificar que el funcionamiento del sistema de ventilación natural es el esperado de acuerdo al diseño de la vivienda, suele recurrirse al modelado numérico empleando códigos de simulación o a la modelación física en el laboratorio. Este último enfoque es el empleado en este trabajo.

DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

La observación de los flujos de ventilación en los experimentos de laboratorio hace posible desarrollar modelos que ofrecen las reglas buscadas para el diseño de sistemas de ventilación eficientes. Para modelar la ventilación conducida por el efecto *stack* en pequeña escala prescindiendo de los efectos viscosos propios de los flujos con Re bajos, se desarrolló la metodología basada en el uso de agua y agua salada en cuyo caso la fuerza de flotación es debida a la diferencia de salinidad entre los fluidos (Marino y Thomas, 2006; Linden, 1999). El uso de agua permite lograr una fácil visualización del flujo empleando *shadowgrafía* o colorantes para marcar los distintos flujos actuantes, y mediante el empleo de técnicas de procesamiento digital de imágenes es posible obtener resultados cuantitativos de temperatura y velocidad del fluido.

Para flujos sostenidos por el efecto *stack* los parámetros adimensionales de interés son el número de Reynolds $Re = UH/\nu$ y el número de Peclet $Pe = UH/\kappa$ con κ coeficiente de difusión molecular, H : escala vertical típica y U : velocidad característica que escala con $(g'H)^{1/2}$, siendo $g' = g\Delta\rho/\rho = g\Delta T/T$ la gravedad reducida. Trabajando con diferencias de salinidad en agua se obtienen valores más grandes de g' y más pequeños de ν y κ lográndose así los valores necesarios de Re y Pe . Tanto en los flujos generados en los modelos de pequeña escala como en las viviendas, $Re > 10^3$ y $Pe > 10^3$, y el flujo resulta independiente de los efectos viscosos y difusivos, excepto para escalas muy pequeñas. Una diferencia de temperatura de 3°C en aire seco y a presión normal corresponde a una diferencia de densidad de 1% en agua aproximadamente. Comparaciones cuantitativas entre mediciones realizadas en modelos de laboratorio y a escala completa (Lane-Serff, 1989; Savardekar, 1990) confirman que los flujos naturales son bien representados cuando se trabaja en pequeña escala usando esta modalidad. Debe señalarse, sin embargo, que los procesos difusivos que tienen lugar usando plumas originadas por la inyección de aire caliente y de una solución salina presentan algunas diferencias. La analogía entre un flujo real y el de laboratorio se verifica, entonces, cuando predominan los procesos convectivos en las plumas. Mayores detalles teóricos y prácticos de la implementación del método, así como también una descripción de la potencialidad del mismo fueron reportados por Marino y Thomas (2006).



Figura 1. Fotografía (a la izquierda) y plano (a la derecha) de la cara lateral que da al este de la vivienda estudiada.

La vivienda analizada en este trabajo, y cuya vista lateral se muestra en la figura 1, fue diseñada por el *Estudio Frolik** de arquitectura. Consta de dos plantas: la cocina, el comedor, el living, el estudio y un baño se encuentran en la planta baja mientras cuatro habitaciones, un estar y otro baño se disponen en la planta alta. Cuenta con un atrio central coronado por una lucarna con aberturas laterales cuya presencia tiene por objeto proveer iluminación natural y evacuar el aire cálido producido por las fuentes internas de calor. La longitud de la lucarna abarca todo el ancho de la casa. El modelo físico empleado consiste en la maqueta de acrílico transparente mostrada en la figura 2, y constituye una sustancial simplificación de la construcción. Tiene 0.72 m de largo, 0.33 m de alto y 0.18 m de ancho, respeta la relación entre las longitudes de los ambientes y de las aberturas, y representa una mitad de la vivienda a escala 1:22 (living y comedor de la planta baja y dos habitaciones y estar de la planta alta). Los resultados pueden extenderse por simetría a la unidad completa. Este modelo prescinde de la escalera interior, las aberturas laterales y otros detalles menores de la construcción (como el puente que une las dos alas), pero preserva las principales características de los contornos que determinan el flujo estudiado.



Figura 2. Modelo físico de la vivienda.

La maqueta se sumerge completamente en un tanque de paredes de acrílico transparente de 0.65 m x 3.00 m x 0.20 m lleno de agua ($\rho = 0.998 \text{ g/cm}^3$). Dos toberas especialmente diseñadas para generar plumas turbulentas (ver parte inferior de la figura 2) introducen un flujo constante Q de $4.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ de agua salada ($\rho_s = 1.054 \text{ g/cm}^3$) simulando la generación de aire cálido por fuentes internas de calor situadas en la planta baja. Este flujo es equivalente al de una fuente de calor que calienta el aire ambiente hasta una temperatura de alrededor de 17°C por encima del valor inicial, si se cumplen las condiciones requeridas para aplicar los principios de la similitud dinámica. En particular, el caudal Q tiene que ser menor que el flujo entre las diferentes partes del interior o hacia el exterior de la vivienda, y el momento vertical del fluido introducido por las fuentes tiene que ser despreciable frente al momento inducido por las fuerzas de flotación. La escala temporal está determinada por $SB^{-1/3}H^{2/3}$, donde S y H son la superficie y altura del edificio (tanto en el modelo como en el prototipo), respectivamente, y $B = g'Q$ es el flujo de flotación. Mayores detalles pueden encontrarse en Marino y Thomas (2006), Linden (1999), Hunt y Kaye (2001) y en las referencias allí citadas.

En el piso se practican seis agujeros de 0.025 m de diámetro para permitir la salida del fluido en exceso en la maqueta sin consecuencias significativas para el flujo. Las mediciones de densidad se efectúan con un densímetro Antón Paar DMA 5500

* Estudio Frolik Arquitectos, Rodríguez 333, 7000 Tandil, Argentina.

con un error inferior al 0.001 % y las del caudal de agua salada con un flotámetro Schilling UV-RX/15 en línea calibrado con el líquido usado (2% de precisión).

Un panel de luces fluorescentes y una pantalla difusora son colocados a un lado del tanque y una video cámara a 6.0 m del otro lado permite registrar lateralmente los experimentos. Un colorante neutro se agrega al agua salada para proveer la visualización del flujo y la determinación de la distribución de densidad. La presencia del colorante reduce la intensidad de la luz proveniente del panel; dicha disminución está relacionada con la densidad del fluido promediada en el ancho del modelo, la que es determinada tras el procesamiento de las imágenes (Thomas *et al.*, 2003). Pueden obtenerse entonces la distribución vertical de densidad y la masa total de fluido contenido en la maqueta asociadas con los perfiles de temperatura y a la energía acumulada en la vivienda, respectivamente.

El arreglo experimental se invierte para simular el flujo de ventilación natural en la vivienda. A fin de simplificar la exposición, las imágenes se presentan y discuten en la próxima sección de acuerdo a la situación real analizada. Así, el flujo de agua salada hacia abajo en el modelo se presenta como el flujo de aire caliente hacia arriba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Presentamos los resultados del análisis de los flujos generados en tres situaciones significativas para validar el diseño. En la figura 3 se muestran algunas imágenes procesadas, en falso color, correspondientes al caso en que la casa está cerrada y dos fuentes de calor simétricamente ubicadas a nivel del piso de la planta baja se encienden a $t = 0$. Según la paleta de colores empleada el color negro corresponde al aire a temperatura ambiente inicial y el blanco a la máxima temperatura alcanzada. En (a) se observa que las plumas turbulentas de aire caliente generadas por las fuentes alcanzaron el cielo raso de la planta baja, y que se formó un frente o interfase de densidad entre el aire calido y el aire ambiente en cada habitación, el cual baja paulatinamente. Cuando este frente alcanza la parte superior de las aberturas internas, el aire cálido comienza a llenar el atrio central mezclándose con el aire allí presente, acumulándose en la parte superior. El aire mezclado en el atrio aumenta su temperatura y comienza a llenar las habitaciones de la planta alta (figura 3b) donde se acumula inicialmente debajo de los cielos rasos. Durante todo este proceso el aire cálido proveniente de las fuentes se mezcló considerablemente dando lugar a una diferencia de temperatura apreciable entre la parte superior de la planta alta y la de la planta baja (figura 3c). Se aprecia además una capa de aire a menor temperatura sobre el piso de ambas plantas a pesar de las capas superiores de aire caliente. Hasta este momento, pese a que las fuentes de calor han entregado una considerable cantidad de energía, no se registra un aumento significativo de la temperatura que afecte a los ocupantes de la vivienda. Finalmente, la figura 3(d) ilustra cómo la temperatura en todo el interior tiende a uniformizarse si las fuentes permanecen encendidas durante un tiempo prolongado.

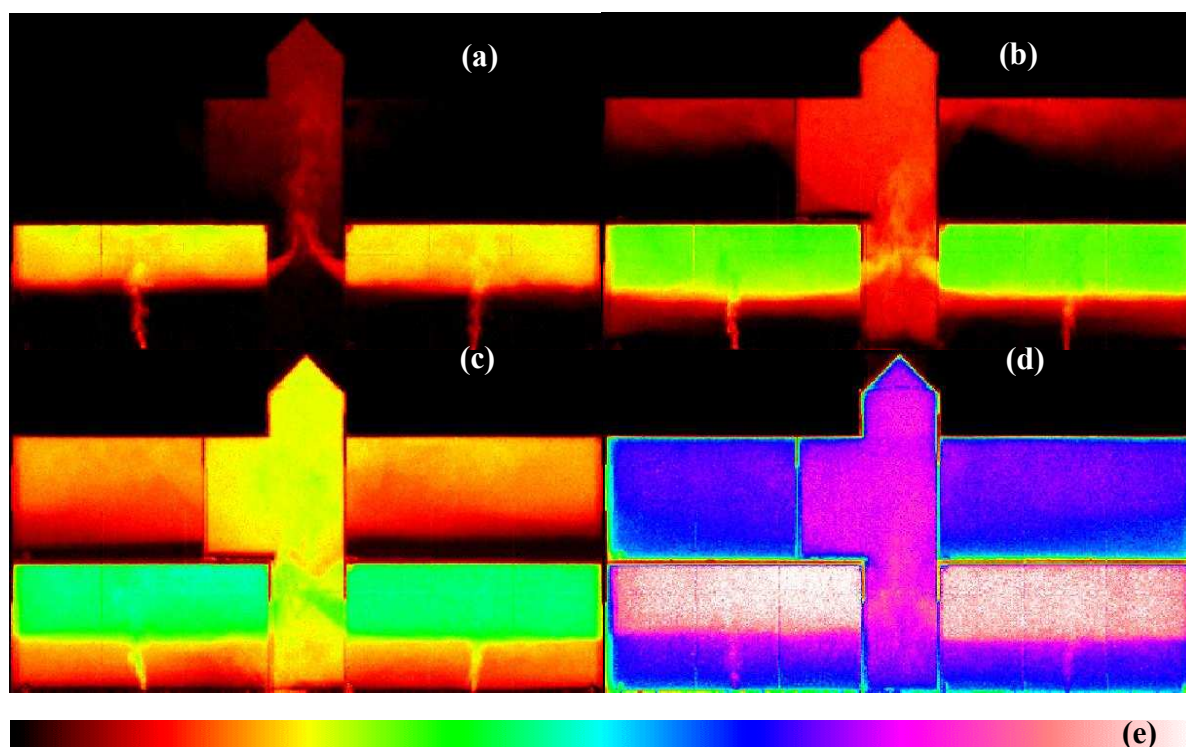


Figura 3. Distribución de densidad para $t = 97$ (a), 137 (b), 277 (c), y 1006 s (d) después de encender las fuentes de calor mientras la casa está completamente cerrada. Abajo se muestra la paleta de colores empleada (e).

En la figura 4(a) se ilustran las distribuciones verticales de las diferencias de temperatura correspondientes a las mismas imágenes mostradas en la figura 3. Se observa una notoria simetría de los perfiles en cada ala de la casa, a pesar del estar sobre uno de los lados y la diferencia de tamaño entre las habitaciones de la planta alta. La temperatura en el primer piso y en el atrio central tiende rápidamente a uniformizarse. La variación de temperatura más importante ocurre a alturas intermedias de la planta baja; por ejemplo para $t = 97$ s dicha variación se verifica en un espesor de aproximadamente 0.1 de la altura total

de la casa (es decir, de 0.56 m). Para tiempos mayores la variación de temperatura sigue ocurriendo a esta altura aunque el aire mezclado haya alcanzado el piso. La existencia de esta variación a una altura intermedia de planta baja se relaciona con las obstrucciones impuestas por la parte superior de las aberturas interiores, es decir con el tramo de mampostería ubicada entre cada puerta y el cielo raso, que contribuyen a retener la capa de aire caliente en el nivel superior de las habitaciones. En la figura 4(b) se ilustra la evolución de la energía térmica acumulada E en el interior de la vivienda obtenida sumando la energía asociada con cada píxel de las imágenes. Como el flujo de calor entregado por las fuentes es constante, y la vivienda está cerrada, su integral en el tiempo (es decir, el calor total entregado) es bien representada por una línea recta. La diferencia entre los puntos experimentales y la recta de la figura 4(b) indica que los valores reportados tienen un error menor al 3%.

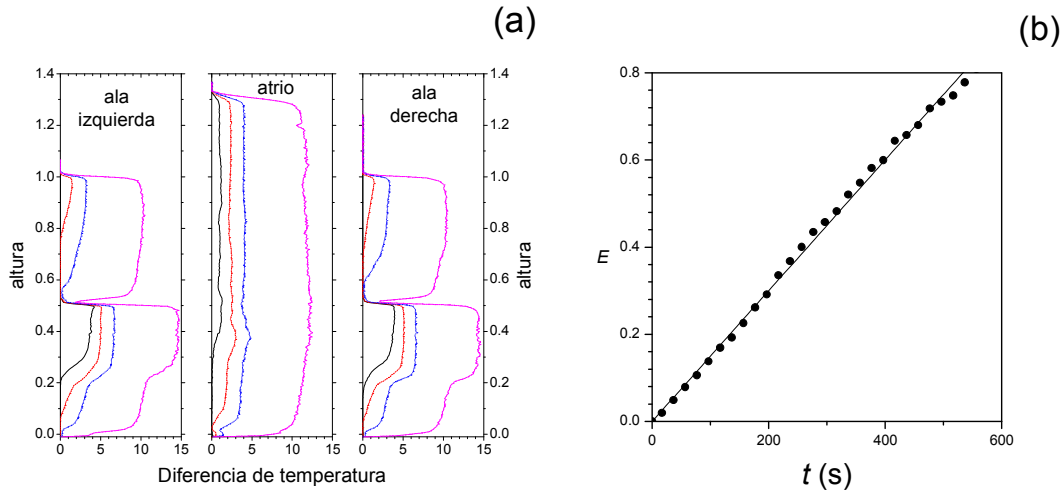


Figura 4. (a) Evolución de los perfiles de temperatura en el ala izquierda (sur), el atrio central y el ala derecha (norte) de la vivienda obtenida a partir de las imágenes de la figura 3. Las líneas de trazo continuo, de rayas, de puntos, y de rayas y puntos corresponden a los tiempos 97s, 137s, 277s, y 1006s, respectivamente. (b) Energía térmica, en unidades arbitrarias, acumulada en la vivienda.

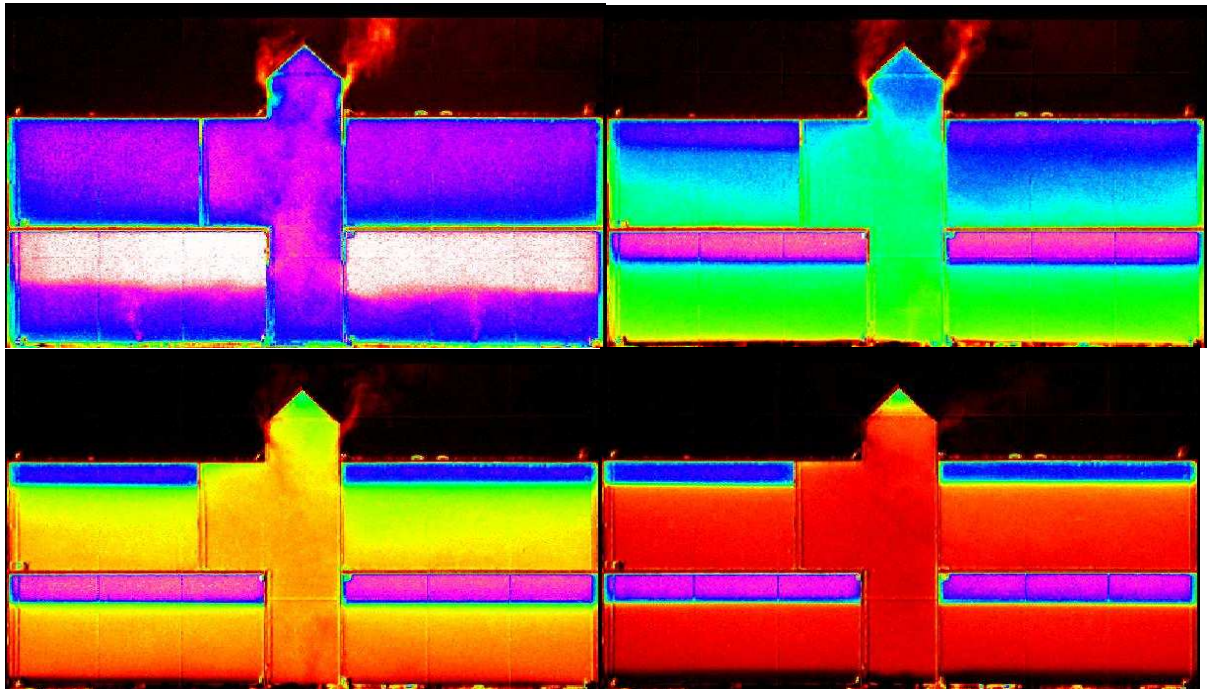


Figura 5. Distribución de densidad en falso color (a) antes, y (b) 400s, (c) 700s y (d) 2080s después apagar las fuentes. La paleta de colores es la misma de la figura 3.

En la figura 5 se muestran algunas de las imágenes procesadas correspondientes a la situación en la que las ventanas laterales de la lucarna son abiertas 950 s antes de apagar las fuentes de calor. La figura 5(a) pertenece a este periodo. En todas las imágenes se distinguen las dos plumas de aire cálido emergiendo al exterior. Como la ventilación se realiza únicamente por las aberturas de la lucarna, el flujo hacia afuera de aire caliente se compensa ahora con otro de aire a temperatura ambiente hacia el interior a través de la misma lucarna. De esta forma la salida de aire cálido es paulatina y el tiempo necesario para el recambio del aire interior es considerable. Es evidente que la temperatura aumenta suavemente con la altura a la vez que

disminuye en cada punto en forma relativamente uniforme excepto en la parte superior de ambas plantas donde el aire más caliente quedó atrapado, aún después de haberse evacuado la casi totalidad del mismo desde el interior de la vivienda (d).

En la figura 6(a) se ilustran las distribuciones verticales de las diferencias de temperatura correspondientes a las mismas imágenes mostradas en la figura 5 que aportan datos cuantitativos sobre la estratificación generada. La evolución de la energía térmica acumulada en la vivienda es representada en la figura 6(b) con símbolos llenos (●). Los valores de E relativamente constantes observados hasta el momento $t = 0$ en el que se cierran las toberas sugieren que el flujo de calor entregado por las fuentes se compensa con el que egresa por la lucarna. Para $t > 0$ la energía térmica en el interior decrece en forma aproximadamente exponencial con un tiempo característico $\tau = 607 \pm 16$ s tendiendo al valor constante $E \approx 0.22$. Esta cantidad está asociada a las capas de aire cálido localizadas en la parte superior de las habitaciones, sugiriendo entonces que el 22% de la energía térmica total entregada es retenida en tales zonas.

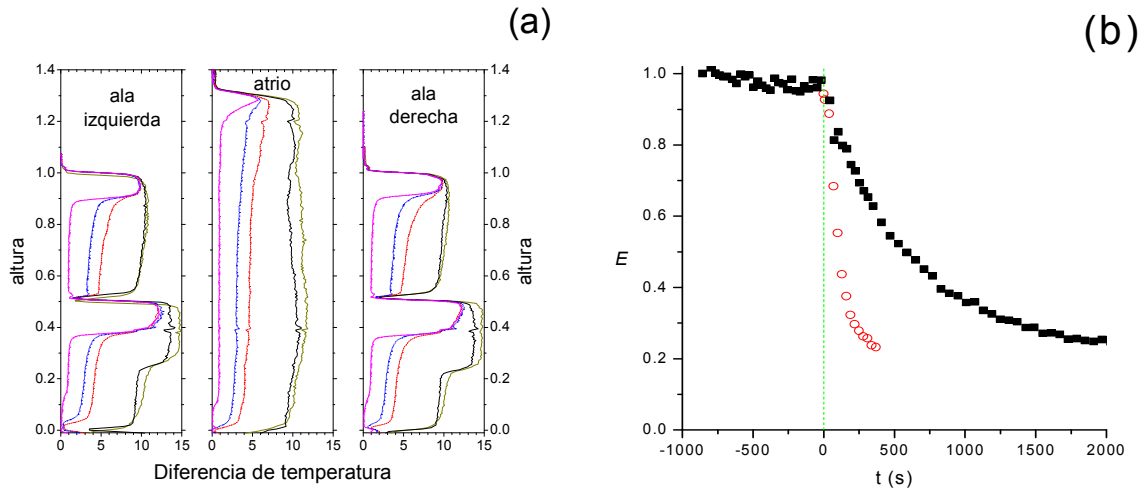


Figura 6. (a) Evolución de los perfiles de temperatura en el ala izquierda (sur), el atrio central y el ala derecha (norte) de la vivienda obtenidos a partir de las imágenes de la figura 5. Las líneas de trazo continuo corresponden a $t = 900$ y 150 s antes de apagar las fuentes mientras que las líneas de rayas, de puntos, y de rayas y puntos a los tiempos 400 , 700 y 2080 s después, respectivamente. (b) Energía térmica, en unidades arbitrarias, acumulada en la vivienda para los experimentos de las figuras 5 (●) y 7 (○).

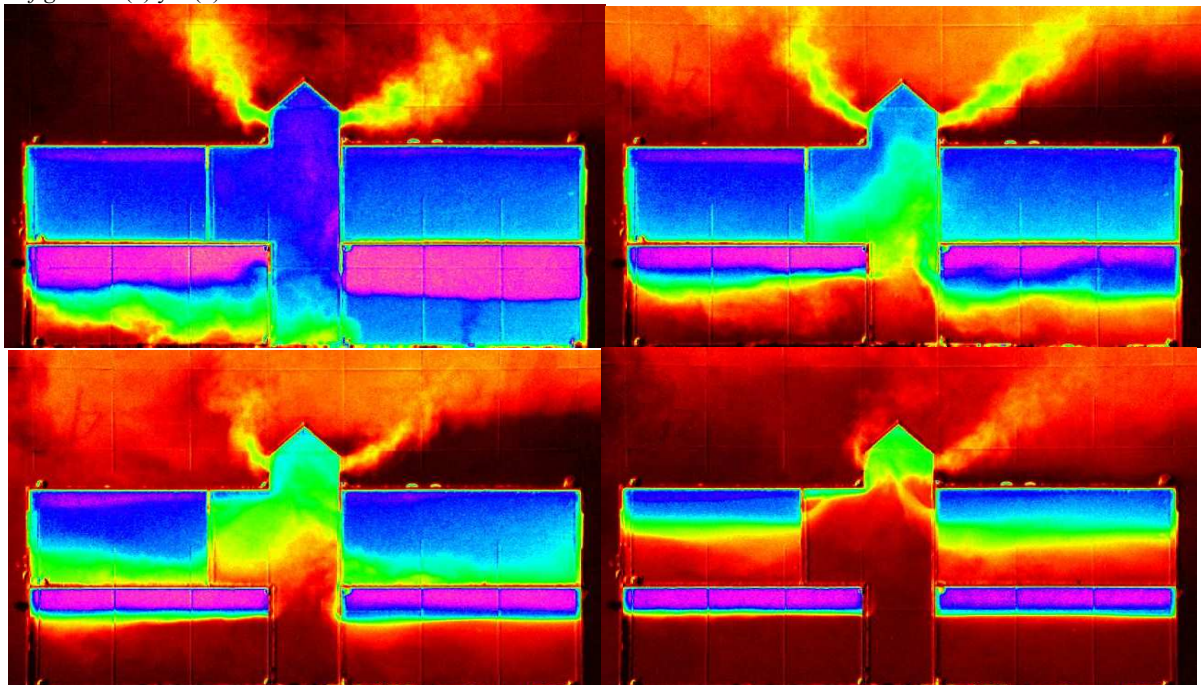


Figura 7. Distribución de densidad, en falso color, a $t = 5$ (a), 35 (b), 65 (c) y 125 (d) segundos después de abrir la abertura situada a la izquierda en planta baja. La paleta de colores es la misma de la figura 3.

situación de interés es la presentada en la figura 7. En ella, una vez que con la casa cerrada y las fuentes encendidas se alcanza una distribución uniforme de densidad a la máxima temperatura alcanzada similar a la mostrada por la figura 3(d), se apagan las fuentes y para ventilar se abren las ventanas de la lucarna y la puerta de planta baja ubicada sobre la cara de la casa que da al sur. Con el brusco ingreso de aire a temperatura ambiente desde la planta baja se genera entonces un fuerte

flujo de aire en el interior a la vez que se incrementa la salida de aire cálido por la lucarna. Como se aprecia en la figura 7(a), el aire desde el exterior ingresa como una corriente de gravedad (Marino y Thomas, 2007) y rápidamente cubre toda la planta baja generando una capa de aire ambiente de espesor relativamente uniforme sobre el piso. Según la figura 7(b), la intensa ventilación generada por efecto *stack* hace que el aire más frío continúe avanzando por la planta baja, y luego pase a la planta alta. Las plumas hacia el exterior disminuyen su intensidad, reflejando una ventilación decreciente. El aire cálido que no quedó atrapado debajo del cielo raso forma corrientes hacia el atrio desde donde finalmente es liberado al exterior de la vivienda por la lucarna. Como es de esperar, el aire cálido retenido en la parte superior de ambas plantas no participa del flujo global. Cuando una de las aberturas de la planta baja y la lucarna están abiertas, el tiempo involucrado en el proceso de ventilación es mucho menor que el empleado cuando sólo la lucarna está abierta. En la figura 6(b) se representa la evolución de la energía térmica acumulada para este caso, obteniéndose un tiempo característico de ventilación $\tau = 104 \pm 7$ s, el cual es seis veces menor que el obtenido en la situación anterior.

En la figura 8 se ilustran las distribuciones verticales de las diferencias de temperatura correspondientes a las mismas imágenes mostradas en la figura 7. Puede notarse la asimetría de los perfiles iniciales de las distribuciones en ambas alas debido al ingreso de la corriente de gravedad de aire a temperatura ambiente en la planta baja.

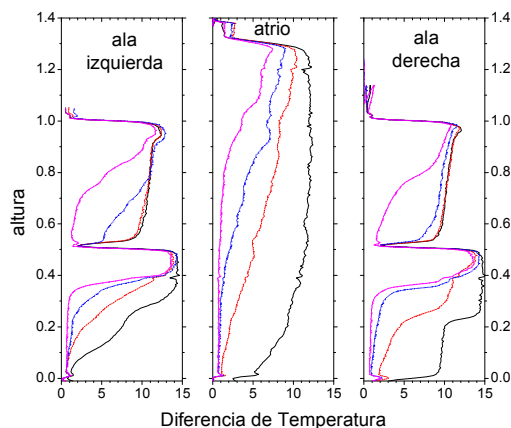


Figura 8. Evolución de los perfiles de temperatura en el ala sur (izquierda), el atrio central y el ala norte (derecha) de la vivienda obtenidos a partir de las imágenes de la figura 7. Las líneas de trazo continuo, de rayas, de puntos, y de rayas y puntos corresponden a los tiempos 5, 35, 65 y 125 s, respectivamente.

CONCLUSIONES

Bajo requerimientos de similitud dinámica, se modelan en el laboratorio los flujos de ventilación generados durante el enfriamiento natural de una vivienda. Los experimentos muestran la evolución de estos flujos de acuerdo al diseño y brindan información cuantitativa de la evolución temporal de la estratificación dependiente de la configuración elegida. La visualización del flujo en los experimentos permite transmitir, aún a no expertos, un conocimiento intuitivo y práctico de las relaciones entre la distribución espacial de ambientes y aberturas y la evolución del flujo generado por diferencias de temperatura.

Se comprobó la conveniencia de incorporar al diseño la amplia lucarna con ventanas laterales que corona el atrio central (el que se comporta como una chimenea) para aumentar la altura, y así las diferencias de densidad que contribuyen a la flotación. Estos elementos se ubican en el centro del edificio para crear flujos cruzados desde los laterales y mejorar la evacuación del aire cálido de todas las habitaciones. El diseño de los ambientes y el tamaño de las aberturas interiores resultan adecuados para una ventilación uniforme en la vivienda, permitiendo el re-cambio de aire en tiempos muy reducidos aún abriendo una sola abertura en la planta baja. Otros experimentos, cuyos resultados no son incluidos aquí por razones de síntesis, muestran que abriendo las aberturas de la planta baja situadas sobre los frentes sur y norte, y las ventanas de la planta alta, la ventilación se incrementa muy poco respecto de la situación mostrada en la figura 7. En este caso el flujo es determinado fundamentalmente por el tamaño de las aberturas de la lucarna. Debe señalarse la existencia de zonas de aire caliente debajo de los cielos rasos, las cuales no participan del flujo global y son difíciles de ventilar en la presente configuración. Resulta aconsejable entonces instalar rejillas hacia el atrio en todas las habitaciones para eliminar estas bolsas de aire caliente. Si bien el comportamiento de los flujos generados en ambas alas muestra simetría, esta puede desaparecer ante diferencias en el tamaño o en la ubicación de las aberturas o ante la presencia de una ligera brisa cuando se abren varias aberturas.

REFERENCIAS

- Filippín C. y Flores Larsen S. (2005) *Comportamiento térmico de invierno de una vivienda convencional en condiciones reales de uso*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9, 05.67-72.
- Hernández A.L. (2005) *Diseño y evolución térmica mediante PREDISE y SIMEDIF de un edificio residencial ubicado en el barrio más elevado de la ciudad de Salta*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9, 05-31-36.
- Hunt G.R. y Kaye N.G. (2001) *Virtual origin correction for lazy turbulent plumes*. J. Fluid Mech. 435, 377-396.
- Kozak D. y Fernández A. (2001) *Resultados de la aplicación de una metodología de evaluación de movimiento de aire en espacios interiores*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 5, 05.91-96.

- Lane-Serff G.F. (1989) *Heat flow and air movement in buildings*. Ph.D. Tesis. Cambridge University, Reino Unido.
- Linden P.F. (1999) *The fluid mechanics of natural ventilation*. Ann. Rev. Fluid Mech. 31, 201-238.
- Marino B.M. y Thomas L.P. (2006) *Modelado en el laboratorio de los flujos de ventilación natural usando criterios de similitud dinámica*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 10, 05.139-146.
- Marino B.M. y Thomas L.P. (2007) *Corrientes de gravedad*. 260 pp. ISBN: 978-987-05-2236-2. Independencia Gráfica y Editora. Tandil, Argentina.
- Molina V., Salvo N. y Villena M. (2005) *Análisis fluidodinámico de una vivienda*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9, 05.13-18.
- Savardekar K. (1990) *Aspects of passive cooling. A study on natural ventilation*. M. Phil. Tesis, Cambridge University, Reino Unido.
- Thomas L.P., Marino B.M., Estela M.S. y Mandrini, M. (2003) *Medición de la concentración de trazadores pasivos: Aplicación a las corrientes de gravedad*. Actas VIII Reunión sobre Recientes Avances en Física de Fluidos y sus Aplicaciones, Vol 8, 50-57, 2003. Disponible también en versión electrónica www.exa.unicen.edu.ar/fluidos.
- Yarke E., Fújol M., Vitali L. y Seoane M. (2004) *Ventilación natural – Estimación de parámetros sobre modelos a escala utilizando equipamiento de bajo costo*. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 8, 08.01-06.

ABSTRACT: Natural ventilation flows generated by temperature differences in the laboratory physical model of a house under dynamic similarity criteria are analyzed. The methodology based on the use of water and salt water is employed to model the movements of the ambient temperature air and the warmer air, respectively. In such a case the buoyancy force is caused by salinity difference between the fluids. By opening the windows and doors that communicate with the exterior and a central top roof monitor, different situations are represented to show the noticeable differences of the internal airflows evolution. A very efficient natural ventilation system is obtained when the roof monitor and lower openings are opened simultaneously.

Keywords: natural ventilation, stack effect, laboratory model, flow visualization